

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
7 juillet 2005 (07.07.2005)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2005/062143 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G05B 19/23

(72) Inventeur; et

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/FR2004/003291

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : JOLY, Luc
[FR/FR]; 337, route de Vesonnes, F-74210 FAVERGES
(FR).

(22) Date de dépôt international :

17 décembre 2004 (17.12.2004)

(74) Mandataire : MYON, Gérard; CABINET LAVOIX, 62,
rue de Bonnel, F-69448 LYON Cedex 03 (FR).

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(30) Données relatives à la priorité :

0315068

19 décembre 2003 (19.12.2003) FR

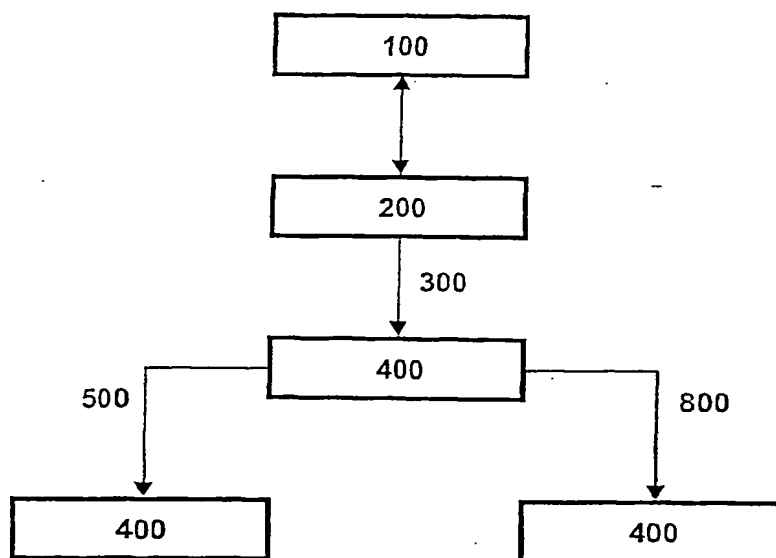
(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,
CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB,
GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG,
KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG,
MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH,
PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
STAUBLI FAVERGES [FR/FR]; Place Robert Stäubli,
F-74210 FAVERGES (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR CONTROLLING DISPLACEMENTS OF THE MOVABLE PART OF A MULTIAXIS
ROBOT

(54) Titre : PROCEDE ET DISPOSITIF DE COMMANDE DES DEPLACEMENTS D'UNE PARTIE MOBILE D'UN ROBOT
MULTI-AXES



(57) Abstract: The inventive method consists in supplying motion instructions (300) at least including information about the path geometry (320) and load instructions (310) to a path generator (400), calculating an allied load signal (800), transmitting said applied load signal (800) to the path generator (400), calculating motion instructions (500) along the path in such a way that the deviation between the projection of the applied load on a tangent to said path and the projection of the instruction on said tangent is minimised and in transmitting said motion instructions (500) to means for actuating a robot (600). A device comprising means (200, 400, 700) for carrying out said control is also disclosed.

[Suite sur la page suivante]

WO 2005/062143 A1



(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Publiée :

— avec rapport de recherche internationale

(57) Abrégé : Ce procédé comprend des étapes consistant à : - fournir à un générateur de trajectoire (400) des instructions de mouvement (300) incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire (320) et à des consignes d'effort (310); - calculer un signal d'effort extérieur (800); - fournir, ce signal d'effort extérieur (800) au générateur de trajectoire (400); - calculer des consignes de mouvement (500) le long de la trajectoire, de façon à minimiser l'écart entre la projection de l'effort extérieur sur la tangente à la trajectoire et la projection de la consigne sur cette tangente et - fournir ces consignes de mouvement (500) à un moyen mise en mouvement du robot (600). Le dispositif comprend les moyens (200, 400, 700) permettant une telle commande.

PROCEDE ET DISPOSTIIF DE COMMANDE DES DEPLACEMENTS D'UNE
PARTIE MOBILE D'UN ROBOT MULTI-AXES

L'invention a trait à un procédé et à un dispositif de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire.

Dans le domaine de la commande des robots multi-axes, il est connu de commander un robot multi-axes grâce à des boucles d'asservissement de type PID (proportionnelle intégrale dérivée) en position, vitesse et courant, afin de faire évoluer la partie terminale d'un robot, qui peut porter un outil ou un préhenseur, sur une trajectoire de géométrie et de profil de vitesse déterminés. Il est également connu de commander un tel robot en diminuant la raideur d'asservissement sur chaque axe, afin de permettre une variation de la position du bras en fonction des efforts d'interaction entre les parties mobiles du robot et leur environnement. Il est en particulier connu, par exemple de US-A-5,742,138, de paramétrer la raideur d'un bras de robot multi-axes dans un système de coordonnées rectangulaires, de mesurer une erreur de position, de calculer un effort et de corriger la position de la partie mobile du robot afin d'obtenir une certaine souplesse de l'organe terminal. Une telle souplesse peut être utilisée pour réaliser des opérations de manipulation de pièces telle qu'un polissage, un ébavurage ou le déchargement d'une presse pour lesquels un effort de contact peut contrarier le mouvement programmé du robot.

Il est également connu de donner un effort de consigne dans un système de coordonnées rectangulaires afin de réaliser une opération à effort contrôlé le long d'une trajectoire, par exemple pour une opération d'ébavurage ou de polissage.

Dans les systèmes connus, on prévoit parfois que l'interface de programmation de trajectoire permette de spécifier des paramètres tels que la vitesse ou l'accélération de la partie mobile sur sa trajectoire, ces
5 paramètres déterminant la position de la partie terminale du bras du robot le long de sa trajectoire en fonction du temps.

Il est également connu de US-A-4,874,997 de contrôler de façon numérique un moteur brushless d'articulation de robot par modulation de largeur d'impulsions.

10 Dans ces systèmes connus, il n'est pas possible de programmer de façon aisée un robot multi-axes pour que la trajectoire de déplacement de sa partie terminale puisse être contrôlée en vitesse et accélération d'une part, et en effort tangentiel à la trajectoire du point de contact de sa partie
15 mobile avec son environnement d'autre part, tout en respectant des valeurs de vitesse et d'accélération compatibles avec la structure mécanique du robot.

Il est également connu de EP-A-0 349 291 de faire dévier un robot de la trajectoire qu'il a apprise pour respecter une
20 consigne d'effort en fonction de la géométrie réelle d'une pièce à traiter. Dans ce cas, le contrôle de l'effort est privilégié par rapport au suivi de la trajectoire, ce qui n'est pas compatible avec certaines utilisations dans lesquelles la trajectoire doit être rigoureusement suivie.

25 C'est à ces inconvénients qu'entend plus particulièrement remédier l'invention en proposant un procédé dans lequel les interactions avec l'environnement de la partie mobile d'un robot, notamment une pièce ou un outil porté par celui-ci, sont contrôlées avec précision.

30 Dans cet esprit, l'invention concerne un procédé de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire dans lequel sont des prévues des étapes consistant à :

- fournir à un générateur de trajectoire des instructions de mouvements incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire et à des consignes d'effort ;

5 - calculer un signal dit d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort exercé par la partie mobile sur son environnement ;

10 - fournir, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, le signal d'effort extérieur au générateur de trajectoire ;

15 - calculer, au moyen du générateur de trajectoire et à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, des consignes de mouvement le long de la trajectoire de façon à minimiser l'écart entre la projection de l'effort extérieur sur la tangente à la trajectoire et la projection de la consigne sur cette tangente ; et

- fournir les consignes de mouvement à un moyen d'asservissement qui permet de mettre en mouvement au moins un axe du robot conformément à ces consignes.

20 L'asservissement en effort tangentiel permet donc de conserver la géométrie de la trajectoire, tout en adaptant la vitesse de la partie mobile sur cette trajectoire.

25 Selon des aspects avantageux, un procédé de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multi-axes peut incorporer une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- Le signal d'effort extérieur est calculé à partir d'une information représentant le courant circulant dans au moins un actionneur du robot.

30 - Il est prévu une étape consistant à utiliser un modèle dynamique du robot lors du calcul du signal d'efforts extérieur.

- Il est prévu une étape consistant à fournir au générateur de trajectoire au moins une valeur limite de vitesse et/ou une valeur limite d'accélération pour prise en

compte lors du calcul des consignes de mouvement, de telle sorte que ces consignes soient conformes à cette ou ces valeurs limites.

L'invention concerne également un dispositif permettant
5 de mettre en œuvre un procédé décrit ci-dessus et, plus spécifiquement, un dispositif qui comprend :

- un générateur de trajectoire apte à calculer des consignes de mouvements en fonction d'instruction de mouvements incluant au moins des informations relatives à la
10 géométrie de la trajectoire et à des consignes d'efforts et
- un estimateur d'effort apte à générer un signal d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort exercée par la partie mobile sur son environnement et à fournir ce signal au générateur de trajectoire, à une
15 fréquence d'échantillonnage prédéterminée, alors que le générateur de trajectoire est apte à calculer les consignes de mouvements le long de la trajectoire, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, de façon à minimiser l'écart entre la projection de l'effort extérieur sur la tangente et
20 la trajectoire et la projection de la consigne d'effort sur cette tangente, ces consignes de mouvement étant fournies à un moyen d'asservissement permettant de mettre en mouvement au moins un axe du robot.

De façon avantageuse, ce dispositif comprend un moyen
25 interpréteur de programmes apte à exécuter des programmes qui comportent des instructions de mouvements permettant de spécifier au moins la géométrie de la trajectoire et des consignes d'efforts.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages de
30 celle-ci apparaîtront plus clairement à la lumière de la description qui va suivre d'un mode de réalisation d'un procédé conforme à son principe, donné uniquement à titre d'exemple et fait en référence aux dessins annexés dans lesquels :

- La figure 1 est une représentation schématique de principe d'un robot multi-axes en train de déplacer une fraise le long d'une trajectoire, grâce à un procédé conforme à l'invention.

5 - La figure 2 est une représentation schématique de principe de la répartition des efforts au niveau d'une partie mobile du robot de la figure 1.

- La figure 3 est un schéma-bloc de principe représentant le fonctionnement général de l'invention ;

10 - La figure 4 est un schéma-bloc de principe représentant le transfert des consignes de position au système d'asservissement correspondant pour chaque moteur ;

- La figure 5 est un schéma-bloc de principe représentant l'asservissement de chaque moteur ;

15 - La figure 6 est une représentation de la méthode utilisée pour estimer les efforts extérieurs et

- La figure 7 représente l'algorithme utilisé par le générateur de trajectoire pour générer les consignes de mouvements.

20 Le robot R représenté à la figure 1 est un robot multi-axes à six articulations. Il peut évoluer avec six degrés de liberté. Le robot R peut être commandé en mode cartésien, auquel cas ses degrés de liberté peuvent être trois degrés de liberté en translation selon la direction de trois axes X, Y
25 et Z et trois degrés de liberté en rotation R_x , R_y , et R_z autour des axes précités. Le robot R peut également être commandé en mode articulaire, auquel cas ses degrés de liberté peuvent être six rotations R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 et R_6 autour de ses six axes d'articulation X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 et X_6 .

30 Ce robot est associé à une unité de commande U qui contrôle son fonctionnement pendant les phases d'apprentissage et d'utilisation.

Un boîtier B de commande manuelle peut également être utilisé pendant les phases d'apprentissage.

Dans l'exemple représenté, le robot R porte un outil O, tel qu'une fraise, qu'il convient de déplacer selon une trajectoire T.

Comme il ressort plus particulièrement de la figure 2, on considère que l'outil O est déplacé par le robot R le long du bord B_1 d'une pièce à fraiser. La trajectoire T est globalement parallèle à ce bord. On note F l'effort exercé par l'outil O sur le bord B_1 . On note F_T la composante de cet effort tangente à la trajectoire T et F_N la composante de cet effort normale à la trajectoire T.

Conformément à l'invention, on utilise la valeur de la composante F_T dans le procédé de commande des déplacements de l'outil O.

Dans le descriptif suivant F est utilisé au sens large et représente le vecteur des couples articulaires du bras robot ou le torseur des effort extérieurs intégrant les efforts cartésiens F_x, F_y, F_z , et les couples cartésiens M_x, M_y, M_z .

Comme représenté à la figure 3 l'environnement de programmation 100 permet à l'utilisateur du système de programmer le robot de manière à ce qu'il réalise les opérations souhaitées. Ces opérations sont décrites par des programmes. L'environnement de programmation permet d'apprendre les positions successives que doit atteindre le robot, d'écrire les programmes décrivant l'enchaînement des mouvements, de mettre au point ces programmes, de démarrer leur exécution, de les arrêter, etc...

Pour exécuter les programmes, l'environnement de programmation fait appel à un interpréteur de programmes 200. Celui-ci exécute les programmes destinés à réaliser une tâche par le robot. Les programmes exécutés contiennent, entre autre, des instructions 300, dites instructions de mouvement. Elles décrivent les types de mouvements que doit faire le robot (ligne droite, cercle,... etc), ainsi que les différent

paramètres les caractérisant (point d'arrivée, vitesse, effort,...).

Ces instructions de mouvement 300 sont transférées au générateur de trajectoire 400. Celui est chargé de leur
5 exécution, c'est-à-dire qu'il doit générer régulièrement (typiquement toutes les 4 millisecondes), en fonction de leur type et de leurs paramètres, des consignes de mouvement 500. Ces consignes de mouvement 500 représentent la trajectoire que doit suivre le robot, à chaque instant. Le robot
10 industriel asservi 600 comprend un bras industriel à six axes ainsi que son système d'asservissement. Le système d'asservissement est conçu de manière à piloter les six moteurs du robot (un pour chaque axe), de sorte que la trajectoire réelle du robot suive au mieux la trajectoire
15 définie par les consignes de mouvement 500.

Dans certaines applications, l'organe terminal du robot industriel 600 interagit mécaniquement avec son environnement : par exemple, la pièce qu'il est en train de fraiser. L'estimateur d'effort extérieur 700 est un moyen
20 d'obtenir un signal, dit effort extérieur 800, représentant la valeur et la direction des efforts exercés par le robot sur son environnement. Ce signal est renvoyé au générateur de trajectoire 400 en temps réel (typiquement toutes les 4 millisecondes). Ce dernier utilise ce retour d'information
25 pour modifier les consignes de mouvement, de manière à réguler les efforts d'interactions.

L'environnement de programmation comporte un boîtier de commande qui permet de déplacer le robot dans un mode interactif, de manière à pouvoir apprendre les différentes
30 positions que devra prendre le robot. Il sert aussi d'interface de programmation pour éditer et mettre au point les programmes. Le langage utilisé pour l'écriture de ces programmes est un langage textuel, mais d'autres types de

langages (graphique par exemple) pourraient être utilisés dans le cadre de cette invention.

Le langage utilisé contient des instructions courantes dans les langages de programmation de robot, qui permettent
5 de spécifier différents types de mouvement, de contrôler leur vitesse et accélération ainsi que leur enchaînements.

On présente maintenant, à titre d'exemple, ici deux autres instructions relatives à l'invention.

L'instruction :

10 MOVEJF(position, outil, params, force)
spécifie que le robot doit déplacer l'outil qu'il porte définie par le paramètre « outil », depuis la position finale du mouvement précédent jusqu'à la position définie par le paramètre « position ». Le déplacement se fait en mode
15 articulaire, c'est à dire qu'il y a un rapport de proportionnalité constant entre les déplacements de chaque axe durant le mouvement. Le paramètre « params » spécifie les vitesses et accélérations à ne pas dépasser durant le mouvement. Il spécifie aussi si le mouvement doit être
20 enchaîné au mouvement suivant. Enfin, le paramètre « force » spécifie la valeur désirée de l'effort tangentiel à la trajectoire durant le mouvement. Dans la mesure où les limites de vitesse et d'accélération définies par « params » ne sont pas atteintes, le robot doit adapter son déplacement
25 le long de la trajectoire de manière à maintenir la valeur de l'effort tangentiel la plus proche possible de la valeur spécifiée par le paramètre « force ».

L'instruction :

MOVELF(position, outil, params, force)
30 est similaire. La seule différence est que le mouvement doit s'exécuter en ligne droite.

On peut imaginer facilement des instructions similaires, définissant des trajectoires circulaires, ou définies par des splines ou autres...

Il est important pour l'invention que ces instructions définissent, d'une part, la géométrie de la trajectoire que doit suivre le robot et, d'autre part, la valeur de l'effort tangentiel que doit exercer le robot lors de son déplacement.

5 L'interpréteur de programmes 200 est chargé d'exécuter les programmes élaborés avec l'environnement de développement. Pour exécuter les instructions de mouvement, il vérifie la validité des paramètres spécifiés par l'utilisateur, puis transmet l'instruction de mouvement 300
10 au générateur de trajectoire 400. Les instructions de mouvement 300 contiennent les informations issues des valeurs spécifiées dans le programme, à savoir :

- 310 Définition de la géométrie de la trajectoire : Un indicateur indique le type de trajectoire (articulaire ou
15 ligne droite). Si le type est « articulaire », les coordonnées articulaires q_0 du point de départ et q_1 du point d'arrivée sont données. Si le type est « ligne droite », les coordonnées cartésiennes x_0 du point de départ et x_1 du point d'arrivée sont données.
- 20 - 320 consigne d'effort tangentiel : Il s'agit de la valeur désirée des de la norme de l'effort cartésien exercé par l'extrémité du robot sur son environnement.
- 330 Limite de vitesse : valeur limite v_{max} pour la norme de la vitesse cartésienne de l'extrémité du robot.
- 25 - 340 Limite d'accélération : valeur limite a_{max} pour la norme de l'accélération cartésienne de l'extrémité du robot.

Dans le mode de réalisation décrit ici, les commandes de mouvement 500 sont constituées par les positions angulaires
30 q_{des} des 6 moteurs. Elles sont mises à jour par le générateur de trajectoire toutes les 4 millisecondes. Chacune des six consignes de position q_{des1} , q_{des2} , ... q_{des6} , est transférée au système d'asservissement correspondant pour chaque moteur 601, 602, ... 606 comme représenté à la figure 4.

Chaque moteur est équipé d'un capteur de position et de vitesse. L'asservissement sur chaque moteur est de type proportionnel-intégral-dérivé (PID). A la figure 5, $q_{des,j}$ est la consigne de position sur l'axe j , $q_{mes,j}$ est la position mesurée, $K_{p,j}$, $K_{i,j}$ et $K_{d,j}$ sont les gains respectifs du PID, $I_{des,j}$ est la consigne de courant, $I_{mes,j}$ est le courant mesuré, et p est la variable de Laplace.

D'autres techniques d'asservissement en position peuvent aussi être employée dans le cadre de la présente invention. Par exemple, l'asservissement peut être réalisé par la technique dite de découplage et linéarisation. Dans ce cas, l'asservissement n'est plus réalisé axe par axe. Dans notre exemple, les consignes de mouvement 500 sont les positions angulaires désirées pour chaque moteur. On peut aussi utiliser la position et la vitesse désirées de l'organe terminal, exprimées dans des coordonnées cartésiennes. Les consignes de mouvement peuvent encore être des incréments de position successifs, ou bien les vitesses désirées sur chaque moteur à chaque instant. Le point important pour l'invention est que le générateur de trajectoire 400 calcule en temps réel la trajectoire que doit suivre le robot et qu'un système d'asservissement fait en sorte que le robot suive au mieux cette trajectoire.

De nombreux moyens sont possibles pour estimer l'effort exercé par le robot sur l'extérieur dans le cadre de la présente invention. Le plus simple consiste à placer un capteur d'efforts à l'extrémité du robot. Dans ce cas, l'effort extérieur 800 est exprimé dans des coordonnées cartésiennes. On peut aussi utiliser des capteurs d'efforts ou de couples placé à différents endroits sur le robot.

Dans le mode de réalisation proposé et représenté à la figure 6, on présente une solution qui permet d'estimer l'effort extérieur en utilisant des variables de l'asservissement de position.

La méthode utilisée requière une valeur 701 représentant le courant I circulant dans chaque moteur. Dans notre cas, celle-ci est égale à la mesure de courant Imes utilisée dans le système d'asservissement.

$$5 \quad I = \text{Imes} = [\text{Imes},1 \quad \text{Imes},2 \quad \dots \quad \text{Imes},6]$$

On pourrait aussi bien utiliser la commande de courant, soit

$$I = \text{Ides} = [\text{Ides},1 \quad \text{Ides},2 \quad \dots \quad \text{Ides},6]$$

ou toute autre variable, mesurée ou calculée, représentant
10 les courants circulants dans les moteurs.

Les moteurs utilisés sont des moteurs brushless. Le modèle 702 le plus simple pour ce type de moteur consiste à considérer que le couple délivré Cm 703 est proportionnel au courant traversant le moteur, soit :

$$15 \quad \text{Cm} = \text{Kt} \cdot I$$

Dans cette expression, I et Cm sont des vecteurs contenant les informations relatives à chaque axe et Kt est une matrice diagonale. Des modèles plus complexes pourraient être utilisés en 702.

20 D'autre part, la méthode utilisée requière des signaux représentant les mouvements du robot 711, par exemple les positions, vitesses, accélérations de chaque moteur représenté respectivement par les vecteurs q, dq/dt et d²q/dt². Dans notre cas, ces valeurs sont déduites des mesures
25 capteurs utilisées par le système d'asservissement et leurs dérivées.

$$q = q_{\text{mes}}$$

$$dq/dt = d(q_{\text{mes}})/dt$$

$$d^2q/dt^2 = d^2(q_{\text{mes}})/dt^2$$

30 On pourrait tout aussi utiliser les consignes de positions et leur dérivées : qdes, d(qdes)/dt, d²(qdes)/dt².

A partir des ces informations, et d'un modèle dynamique du bras 712 établi, par exemple, avec les équations de Newton-Euler, on calcule un vecteur Cd représentant les

couples qu'exercerait en théorie chaque moteur du robot, s'il n'exerçait aucun effort sur l'extérieur 713.

On en déduit, par différence en 720, un vecteur Cext 800 qui est une estimation des couples moteurs correspondant aux efforts exercés par le robot sur son environnement 800 :

$$C_{ext} = C_m - C_d$$

La figure 7 montre comment l'algorithme utilisé par le générateur de trajectoire peut être décomposé en quatre parties :

10 A partir de la consigne d'effort tangentiel 310, de l'effort extérieur 800 et de la géométrie de la courbe 320, on calcule en 410 une variable d'erreur scalaire 420. Les limitations de vitesse 330 et d'accélération 340 sont projetées en 430 sur la courbe 320. A partir des limites de
15 vitesse et d'accélération projetées 470 ainsi que de la variable d'erreur 420, un régulateur 430 calcule le mouvement désiré le long de la courbe 440. Les consignes de mouvement du robot 500 sont alors calculées en 450 à partir de la définition de la géométrie de la courbe 320 et du mouvement
20 le long de la courbe 440.

Chacune de ces quatre parties est décrite dans ce qui suit.

A - Calcul de la variable d'erreur (410-420) : cas
25 d'un mouvement en ligne droite.

Le calcul de la variable d'erreur 420 est présenté ici dans le cas d'un mouvement en ligne droite. Les calculs qui suivent consistent à calculer la projection sur la courbe 320 de la différence entre la consigne d'effort 310 et l'effort
30 extérieur 800.

Lors d'un mouvement en ligne droite, la position cartésienne x du robot (vecteur) peut être paramétrée de la manière suivante :

$$x = x_0 + s \cdot (x_1 - x_0)$$

Où x_0 est la position cartésienne de départ du mouvement, x_1 est la position cartésienne d'arrivée, et s est un paramètre scalaire compris entre 0 et 1. On peut ré-écrire l'équation précédente sous la forme

$$5 \quad x = f(s) \quad (\text{Eq. 1})$$

En dérivant cette équation, on a :

$$v = dx/dt = df/ds \cdot ds/dt \quad (\text{Eq. 2})$$

Dans cette expression df/ds est un vecteur cartésien tangent à la courbe. Le vecteur cartésien

$$10 \quad u = (df/ds) / || df/ds ||$$

est unitaire et tangent à la courbe.

Dans notre exemple, la consigne d'effort 300 est la norme de l'effort tangent cartésien. Le vecteur d'effort cartésien désiré vaut donc :

$$15 \quad F_{des} = f_{des} \cdot u \quad (\text{Eq. 3})$$

L'effort extérieur 800 est donné par le vecteur des couples articulaires C_{ext} . On peut transformer cette valeur en coordonnées cartésienne en utilisant la formule suivante :

$$F_{ext} = J^{-t} \cdot C_{ext} \quad (\text{Eq. 4})$$

20 où J^{-t} est l'inverse de la transposée de la matrice jacobienne du robot.

La variable de commande choisie 420, notée ϵ , est la différence entre l'effort tangent désiré et l'effort extérieur, projeté sur la tangente à la trajectoire, soit :

$$25 \quad \epsilon = u^t \cdot (F_{des} - F_{ext})$$

Ce calcul reste valide quel que soit la fonction f utilisée (cercle, spline, ou autre...), dans la mesure où elle est différentiable, ce qui signifie qu'on peut définir sa tangente en tout point.

30 Ce calcul a été conduit dans le cas particulier où la consigne d'effort 300 est la norme d'un vecteur d'effort cartésien et l'effort extérieur 800 est donné en coordonnées articulaires. En utilisant les formules de changement de coordonnées adéquates, par exemple à la place des équations

Eq. 3 et Eq. 4, on peut traiter les cas où les ces information sont données dans n'importe quel système de coordonnées.

5 *B - Calcul de la variable d'erreur (410-420) : cas d'un mouvement articulaire*

Dans le cas d'un mouvement articulaire, la position articulaire q du robot peut être paramétrée de la manière suivante :

10 $q = q_0 + s \cdot (q_1 - q_0)$

où q_0 est la position articulaire de départ du mouvement, q_1 est la position articulaire d'arrivée, et s est un paramètre scalaire compris entre 0 et 1. On peut ré-écrire l'équation précédente sous la forme

15 $q = g(s)$

La position cartésienne correspondante est

$x = k(q(s))$

où k est le modèle géométrique direct du robot.

Le mouvement articulaire peut donc se traiter comme le
20 mouvement cartésien, en choisissant la fonction f telle que :

$f(s) = k(q(s))$

C - Projection des limites de vitesse et d'accélération le long de la courbe (460)

25 Dans notre exemple, les limites de vitesse sont données en coordonnées cartésiennes. Autrement dit, on souhaite que la norme de la vitesse v du robot soit inférieure à une vitesse donnée v_{max} , et la norme de l'accélération cartésienne dv/dt soit inférieure à une accélération donnée
30 a_{max} .

On définit les valeurs suivantes :

$(ds/dt)_{max} = \min (v_{max} / || df/ds || ; c \cdot \sqrt{a_{max} / || df/ds ||})$ (Eq. 5)

$(d^2s/dt^2)_{max} = (a_{max} - || df/ds || \cdot (ds/dt)_{max}) / || d^2f/ds^2 ||$ (Eq. 6)

où

c est une constante telle que $0 < c < 1$

$\text{sqrt}()$ dénote la fonction racine carrée

Supposons qu'on ait :

$$| ds/dt | \leq (ds/dt)_{\max}$$

$$5 \quad | d^2s/dt^2 | \leq (d^2s/dt^2)_{\max}$$

Alors, d'après l'équation Eq. 2, on a :

$$|| v || = || df/ds \cdot ds/dt || = || df/ds || \cdot |ds/dt| \leq || df/ds || \cdot (ds/dt)_{\max}$$

Et donc, d'après l'équation Eq. 5, on a :

$$|| v || \leq v_{\max}$$

10 D'autre part, en dérivant l'équation Eq. 2, on a

$$a = df/ds \cdot d^2s/dt^2 + d^2f/ds^2 \cdot (ds/dt)^2$$

donc

$$|| a || = || df/ds \cdot d^2s/dt^2 + d^2f/ds^2 \cdot (ds/dt)^2 ||$$

$$\leq || df/ds || \cdot |d^2s/dt^2| + || d^2f/ds^2 || \cdot |ds/dt|^2$$

$$15 \leq || df/ds || \cdot (d^2s/dt^2)_{\max} + || d^2f/ds^2 || \cdot (ds/dt)_{\max}^2$$

En utilisant les définitions des équations Eq. 5 et Eq. 6, on obtient :

$$|| a || \leq a_{\max}$$

Les valeurs $(ds/dt)_{\max}$ et $(d^2s/dt^2)_{\max}$ définissent donc des
20 contraintes sur les dérivées de s , qui font en sorte que les limites de vitesse et d'accélération cartésiennes sont vérifiées. On peut donc considérer que ce sont les projections des limites de vitesse et d'accélération cartésienne dans les coordonnées de s .

25 De manière similaire, on pourrait avoir des limitations de vitesse et/ou d'accélération articulaire en utilisant la fonction $h(s) = k^{-1}(f(s))$ à la place de la fonction f dans les calculs précédents.

30 D - Régulateur (430)

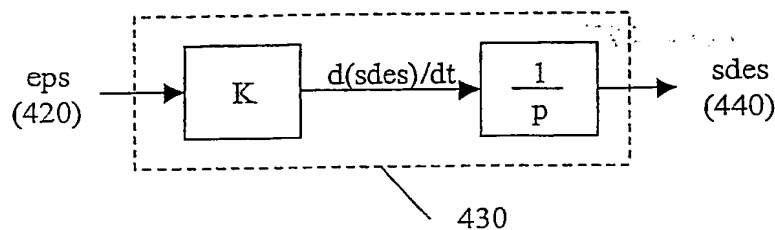
Le régulateur 430 a pour rôle de générer des mouvements le long de la courbe 440, de manière à maintenir la variable d'erreur la plus proche de zéro 420.

Le régulateur utilisé est de type intégral. Un régulateur intégral « classique » peut s'exprimer sous la forme suivante :

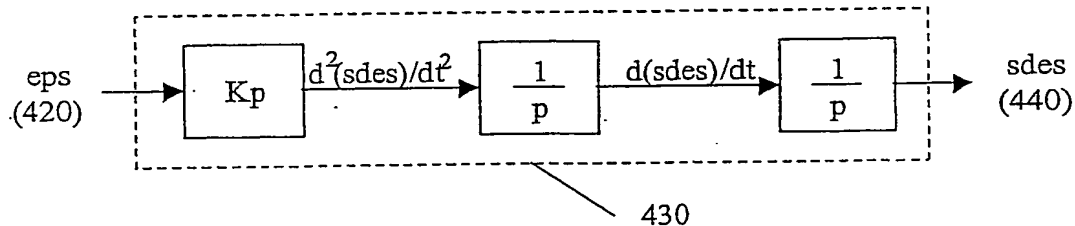
$$d(sdes)/dt = K \cdot eps$$

$$sdes = \int d(sdes)/dt \cdot dt$$

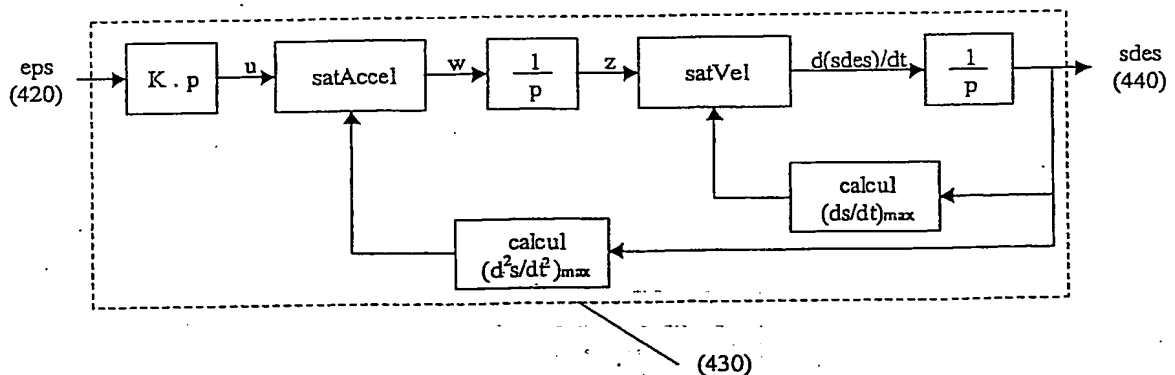
où $sdes$ est la position désirée du robot le long de la courbe, exprimée dans les unités du paramètre s de l'équation Eq. 1, et K une constante. Ceci est représenté sur le schéma-block suivant, où p désigne la variable de Laplace.



Ce schéma est équivalent à :



Pour intégrer les limitations de vitesse et d'accélération, on modifie le schéma de la manière suivante.



Les blocs « calcul $(ds/dt)_{max}$ » et « calcul $(d^2s/dt^2)_{max}$ » calculent les limites de vitesse et d'accélération projetées,

en fonction de s_{des} , selon les équation Eq. 5 et Eq. 6 (df/ds et d^2f/ds^2 sont évaluées pour $s = s_{des}$). Le bloc satVel sature la vitesse z en entrée en fonction de $(ds/dt)_{max}$. Autrement dit, on a :

5

$$d(s_{des})/dt = \begin{cases} (ds/dt)_{max} & \text{si } z > (ds/dt)_{max} \\ z & \text{si } |z| \leq (ds/dt)_{max} \\ - (ds/dt)_{max} & \text{si } z < - (ds/dt)_{max} \end{cases}$$

10

De même, satAccel sature l'accélération u en fonction de $(d^2s/dt^2)_{max}$, soit :

15

$$w = \begin{cases} (d^2s/dt^2)_{max} & \text{si } u > (d^2s/dt^2)_{max} \\ u & \text{si } |u| \leq (d^2s/dt^2)_{max} \\ - (d^2s/dt^2)_{max} & \text{si } u < - (d^2s/dt^2)_{max} \end{cases}$$

Dans tous les cas, ce schéma assure que :

$$|d(s_{des})/dt| < (ds/dt)_{max}$$

ce qui garantit que la norme de la vitesse cartésienne désirée le long de la trajectoire est inférieure à v_{max} .

20

Lorsque la vitesse maximale n'est pas atteinte, on a

$$z = d(s_{des})/dt$$

donc

$$25 \quad w = d^2(s_{des})/dt^2$$

alors,

$$|d^2(s_{des})/dt^2| < (d^2s/dt^2)_{max}$$

ce qui garantit que la norme de l'accélération cartésienne est inférieure à a_{max} .

30

Dans un cadre général, l'algorithme présenté assure que la limite de vitesse cartésienne est toujours respectée et que la limite d'accélération est respectée dans la mesure où la vitesse cartésienne maximale n'est pas atteinte. Dans le cas de la ligne droite, lorsque la limite de vitesse est

18.

atteinte, l'accélération est nulle, donc la limite d'accélération est respectée.

E - Calcul (430) des consignes de mouvement (500)

5 Dans notre cas, les consignes de mouvement 500 sont les coordonnées articulaires du robot qdes. A partir de la position désirée le long de la courbe sdes, on peut calculer la consigne de position cartésienne correspondante, grâce à l'équation paramétrique de la courbe Eq. 1.

10 $x_{des} = f(s_{des})$

Ensuite, on trouve les coordonnées articulaires grâce au modèle géométrique inverse du robot, noté k^{-1} .

$q_{des} = k^{-1}(x_{des})$

15 Si les consignes de mouvement étaient des vitesses, on pourrait utiliser les changements de coordonnées correspondant sur les vitesses (Equation Eq. 2 et inverse de la matrice jacobienne du robot).

REVENDICATIONS

1. Procédé de commande des déplacements d'une partie
5 mobile d'un robot multi-axes le long d'une trajectoire, caractérisé en ce qu'il comprend des étapes consistant à :

- fournir à un générateur de trajectoire (400) des instructions de mouvement (300) incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire (320)
10 et à des consignes d'effort (310) ;

- calculer un signal (800) dit d'effort extérieur représentant au moins une composante de l'effort (F) exercé
~ par ladite partie mobile (O) sur son environnement ;

- fournir, à une fréquence d'échantillonnage
15 prédéterminée, ledit signal d'effort extérieur (800) audit générateur de trajectoire (400) ;

- calculer, au moyen dudit générateur de trajectoire (400) et à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, des consignes de mouvement (500) le long de ladite trajectoire
20 (320) de façon à minimiser l'écart entre la projection (F_T) de l'effort extérieur sur la tangente (T) à la trajectoire et la projection de la consigne sur ladite tangente et

- fournir lesdites consignes de mouvement (500) à un moyen d'asservissement (601-606) qui permet de mettre en
25 mouvement au moins un axe dudit robot (600) conformément auxdites consignes de mouvement (500).

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ledit signal d'effort extérieur (800) est calculé à partir d'une information représentant le courant circulant
30 dans au moins un actionneur (601-606) dudit robot (600).

3. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape consistant à utiliser un modèle dynamique (712) dudit robot (600) lors du calcul dudit signal d'effort extérieur (800).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend une étape consistant à fournir audit générateur de trajectoire (400) au moins une valeur limite de vitesse (330) et/ou une valeur limite d'accélération (340) pour prise en compte lors du calcul desdites consignes de mouvement (500), de telle sorte que lesdites consignes soient conforme à ladite ou auxdites valeurs limites.

5. Dispositif de commande des déplacements d'une partie mobile d'un robot multiaxes le long d'une trajectoire, caractérisé en ce qu'il comprend :

- un générateur de trajectoire (400) apte à calculer des consignes de mouvement (500) en fonction d'instructions de mouvements (300) incluant au moins des informations relatives à la géométrie de la trajectoire (320) et à des consignes d'effort (310) et

- un estimateur d'effort (700) apte à générer un signal d'effort extérieur (800) représentant au moins une composante de l'effort (F) exercé par ladite partie mobile (O) sur son environnement et à fournir ledit signal audit générateur de trajectoire, à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, alors que ledit générateur de trajectoire est apte à calculer lesdites consignes de mouvement (500) le long de ladite trajectoire (320), à une fréquence d'échantillonnage prédéterminée, de façon à minimiser l'écart entre la projection (F_T) de l'effort extérieur sur la tangente (T) à la trajectoire et la projection de la consigne d'effort sur ladite tangente, lesdites consignes de mouvement (500) étant fournies à un moyen d'asservissement (601-606) permettant de mettre en mouvement au moins un axe dudit robot (600).

6. Dispositif selon la revendication 5, caractérisé en ce qu'il comprend un moyen interpréteur de programme (200) apte à exécuter des programmes qui comportent des instructions de mouvement (300) permettant de spécifier au

moins la géométrie de la trajectoire (320) et des consignes d'effort (310).

1/4

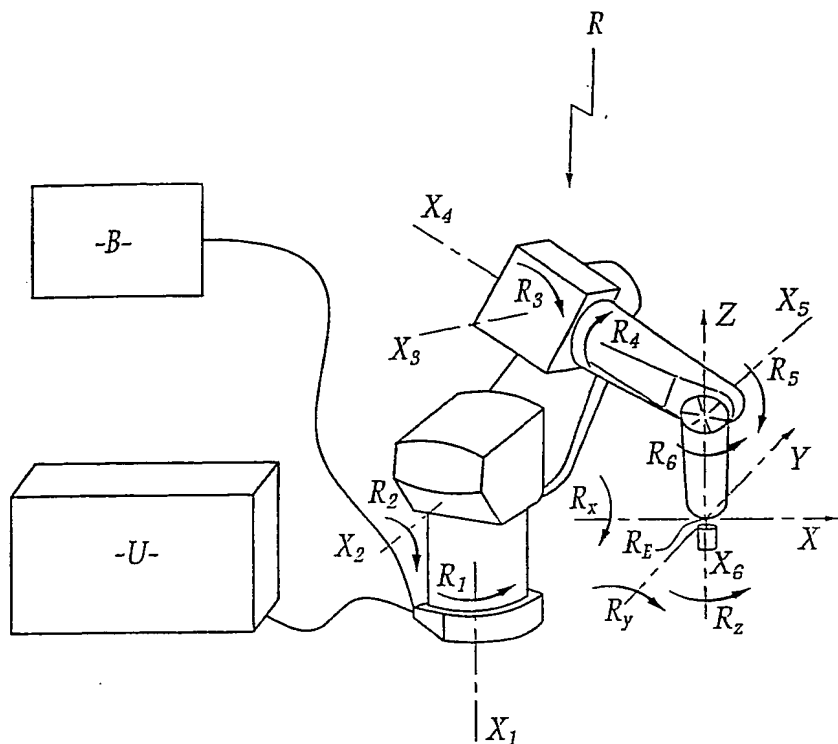


Fig. 1

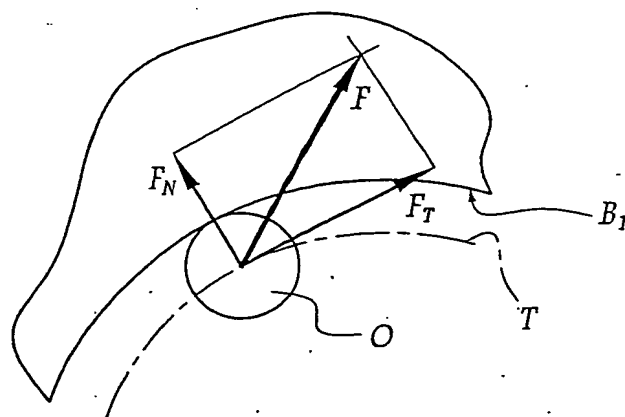
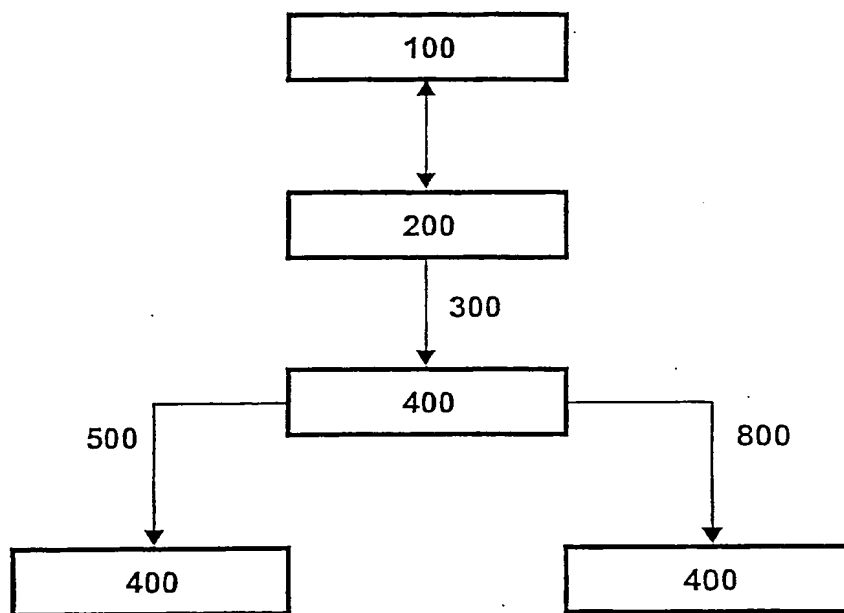
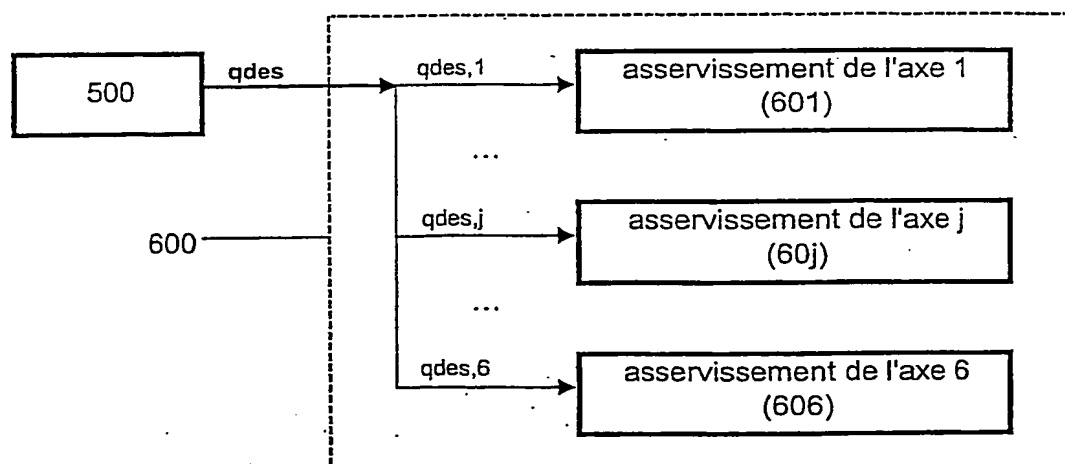


Fig. 2

2/4

*Fig.3**Fig.4*

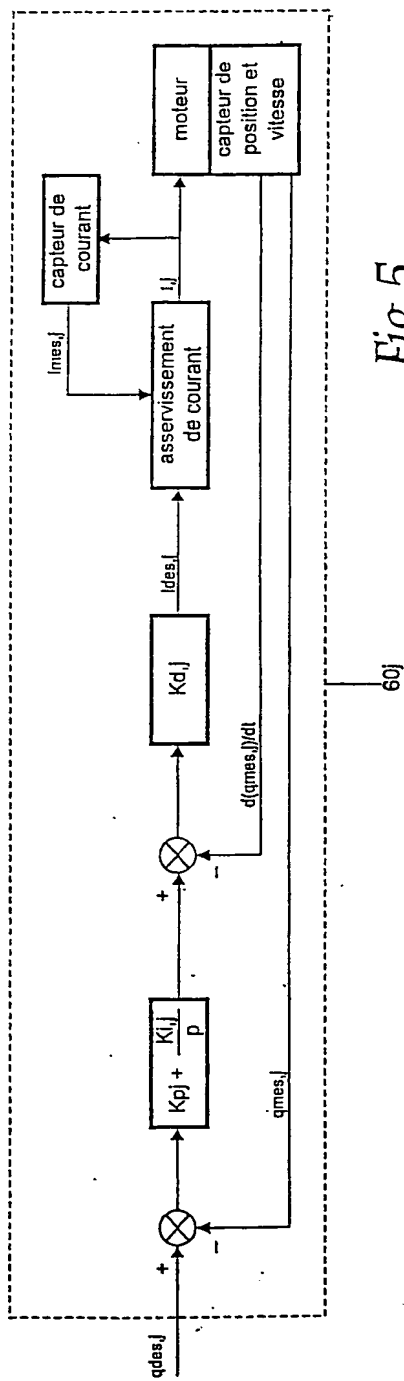


Fig. 5

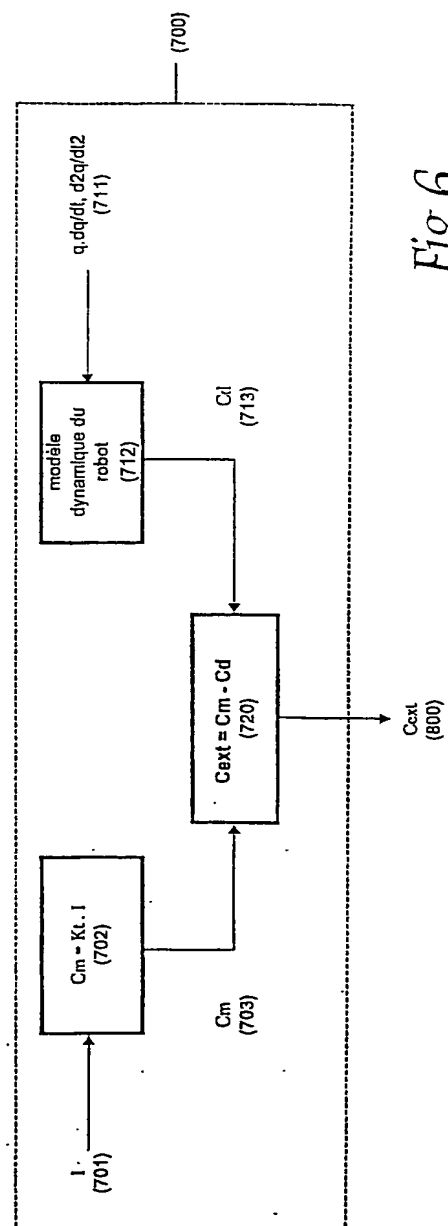


Fig. 6

4/4

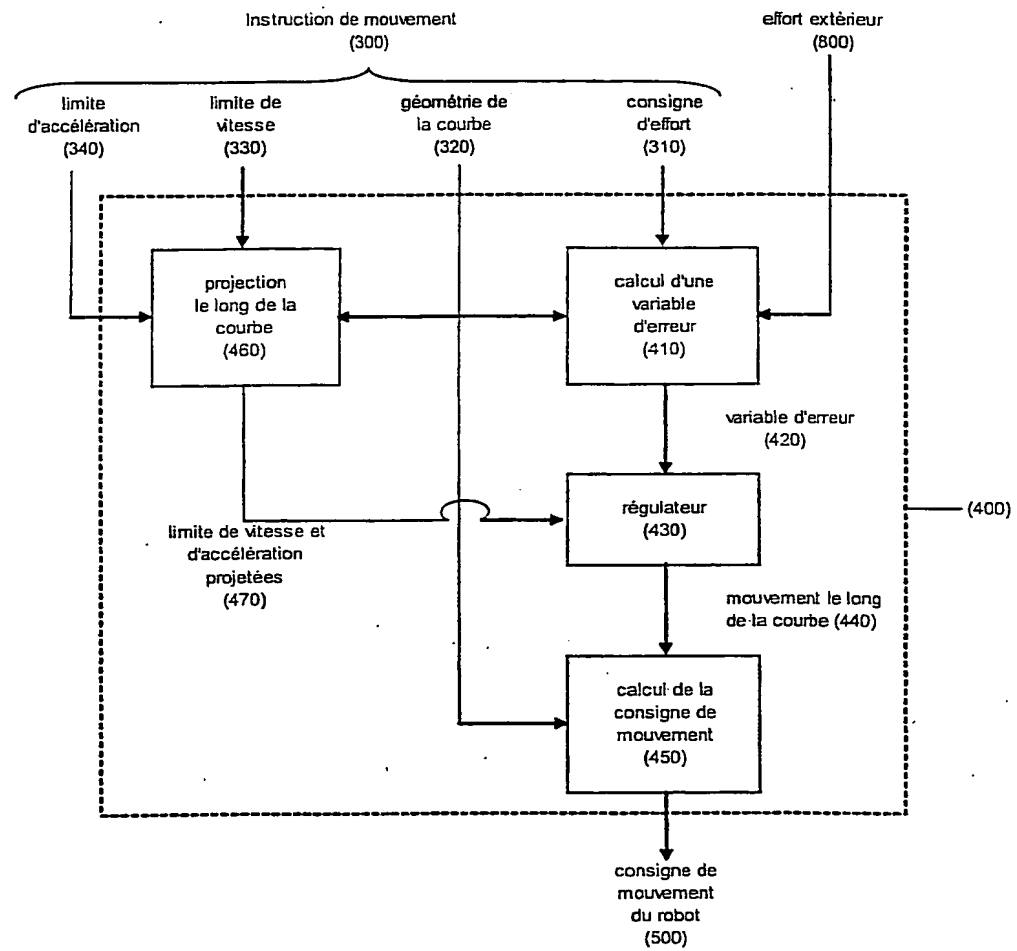


Fig. 7

International Application No
PCT/FR2004/003291

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G05B19/23

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	EP 0 349 291 A (TOYOTA MOTOR CO LTD) 3 January 1990 (1990-01-03)	1,5,6
Y	page 1, lines 7,8 page 4, line 58 - page 5, line 3	2
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 21, 3 August 2001 (2001-08-03) & JP 2001 105152 A (KAWASAKI HEAVY IND LTD), 17 April 2001 (2001-04-17) abstract	2

☐ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents; such combination being obvious to a person skilled in the art
- * & * document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 May 2005

Date of mailing of the international search report

27/05/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Messelken, M

Information on patent family members

International Application No.

PCT/FR2004/003291

Patent document cited in search report		Publication date		Patent family member(s)	Publication date
EP 0349291	A	03-01-1990	JP	2015956 A	19-01-1990
			JP	2676793 B2	17-11-1997
			DE	68920212 D1	09-02-1995
			EP	0349291 A2	03-01-1990
			US	4967127 A	30-10-1990
JP 2001105152	A	17-04-2001	JP	3359011 B2	24-12-2002

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dem. de Internationale No

PCT/FR2004/003291

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G05B19/23

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G05B

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, PAJ, WPI Data, INSPEC

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	EP 0 349 291 A (TOYOTA MOTOR CO LTD) 3 janvier 1990 (1990-01-03)	1,5,6
Y	page 1, ligne 7,8 page 4, ligne 58 - page 5, ligne 3	2
Y	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 2000, no. 21, 3 août 2001 (2001-08-03) & JP 2001 105152 A (KAWASAKI HEAVY IND LTD), 17 avril 2001 (2001-04-17) abrégé	2

☐ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

T document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

X document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

Y document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

Z document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

11 mai 2005

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

27/05/2005

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Messelken, M

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication		Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
EP 0349291	A	03-01-1990	JP	2015956 A	19-01-1990
			JP	2676793 B2	17-11-1997
			DE	68920212 D1	09-02-1995
			EP	0349291 A2	03-01-1990
			US	4967127 A	30-10-1990
JP 2001105152	A	17-04-2001	JP	3359011 B2	24-12-2002